

УДК 621.922.34

М. М. Шейко, д-р техн. наук, А. П. Максименко, П. І. Бологов,
Київ, Україна

ПРАЦЕЗДАТНІСТЬ ПРАВЛЯЧОГО ІНСТРУМЕНТУ З ПРОТЕКЦІЄЮ АЛМАЗНО-ГАЛЬВАНІЧНОГО ПОКРИТТЯ

Показано, що протекція алмазно-гальванічного покриття (АГП) алмазним мікропорошком підвищує період стійкості правлячих роликів, виготовлених методом гальванопластики, на 90%, а період до повного руйнування АГП – на 125%.

Ключові слова: період стійкості, гальванопластика

Показано, что протекция алмазно-гальванического покрытия (АГП) алмазным микропорошком повышает период стойкости правящих роликов, изготовленных методом гальванопластики, на 90%, а период до полного разрушения АГП – на 125%.

Ключевые слова: период стойкости, гальванопластика

It is shown that the protection of the diamond-galvanic coating (AGP) with diamond micropowder increases the stability period of the dressing rollers, made by the electroforming method, by 90%, and the period before the complete destruction of the AGP by 125%.

Keywords: stability period, electroforming method

В роботі [1] для правлячих роликів прямого профілю АС200Т 400/315 було запропоновано і реалізовано метод протекції алмазно-гальванічного покриття (АГП) алмазним мікропорошком. Подальша робота присвячена стійкісним випробуванням і порівняльному аналізу роликів зі звичайним АГП і з АГП з протекцією. Контрольні зразки роликів було виготовлено з точно такими ж параметрами, але без протекції.

Випробування проводилося за методикою квазіврізної правки [2] абразивних кругів на спеціальному стенді на базі круглошліфувального верстата ЗБ151 з автономним приводом правлячого ролика. Для забезпечення умов роботи алмазного шару ролика таких, як при врізній правці, осьова подача S була, відповідно до [2], призначена рівній довжині L ділянки АГП, що випробовується. Швидкість абразивного круга (29 м/с) і ролика (14,6 м/с) відповідали режимам правки, застосовуваним в виробничих умовах. Заправлялися абразивні круги Ø600×63×305 марки 24A25СМ2К5 при осьовій подачі $S = 3,35$ мм/об ($U = 61,8$ мм/с) і подачі на глибину $t_0 = 0,010$ мм.

Порівняльні випробування стійкості проводилися в однакових (для контрольного і посиленого роликів) умовах шляхом правки кругів на зазначених вище режимах. Періодично правка припинялася, випробовуваний ролик знімався з установки і вимірювався знос його АГП. На відміну від вагового методу вимірювання витрати алмазів (де в залік йшла вага і зношеної частини алмазів, і цілих вивалившись з зв'язки зерен, і, можливо,

вага зношеної зв'язки) в нашому – метричному методі [3] – відстежувався лише абразивний знос алмазів, який зумовлює розмірну стійкість роликів до моменту виривання зерен з зв'язки. Суть методу полягала в тому, що робочий профіль роликів містив занижену – в нашому випадку на 1 мм – частину, що служила базою і не контактувала з заправляємим кругом в процесі основної роботи, а отже, не була піддана зносу (рис. 1, а). Відносно цієї бази вимірювався лінійний знос δ головній частині профілю. В силу дискретності робочої поверхні алмазного ролика, лінійний знос вимірювався опосередковано. Роликом з поточним зносом АГП за схемою врізної подачі заправлявся сторонній абразивний круг, на який, внаслідок цього, переносився профіль ролика. Сформований на кругі профіль, в свою чергу, за допомогою врізного шліфування переносився на пластинчастий свідок. Висота робочої ділянки профілю над базою на пластинчастому свідку замірялася на мікроскопі УИМ-21 з номінальною точністю ± 2 мкм. Від'ємний приріст цієї висоти між двома точками стійкісних випробувань інтерпретувався як лінійний знос АГП ролика за цей період. Лінійний знос δ сам по собі є найважливішим параметром, що характеризує розмірну стійкість правлячого інструменту, але традиційна питома витрата алмазів $Q_{\text{пит}}$ легко перераховувався за лінійним зносом за методикою [3].

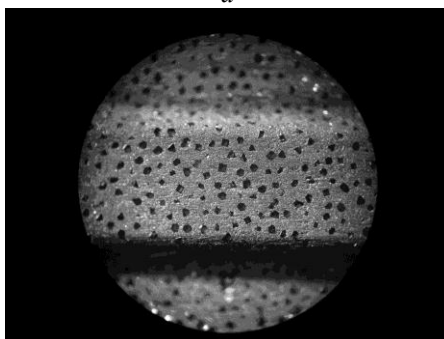
Ще один параметр зносу АГП – це питомий об'єм кишень в межзереному просторі ω . Він обумовлював ступінь закладення алмазних зерен в нікелевій матриці роликів [4, 5]. В силу використання в сучасних правлячих інструментах алмазних порошків високих марок знос зв'язки став переважаючим фактором, що визначає стійкість цього інструменту.

Як і для лінійного зносу, змінення питомого об'єму кишень було встановлено як функцію об'єму диспергованого матеріалу шліфувальних кругів, що заправляються. В силу того, що правка проводилася за квазіврізної схемою [2], що імітує врізну правку, значення мав об'єм, приведений до одиниці довжини робочого профілю правлячого інструменту. Це очевидно, – адже, скажімо, два ролика, що розрізняються по довжині робочого профілю в 2 рази, але в усьому іншому – в тому числі по режимах правки – ідентичні, будуть зношуватися в однаковому темпі, не дивлячись на те, що більш широкий видалятиме в 2 рази більший об'єм. Отже, одиниця справленої «роботи», адекватна умовам правки, – це наведений об'єм диспергованого абразивного матеріалу кругів, що заправляються. Його розмірність – $\text{мм}^3/\text{мм}$. Для наочності було використано умовні одиниці. В якості однієї умовної одиниці (у.о.) було взято об'єм стандартного абразивного круга $\varnothing 600 \times 63 \times 305$, приведений до його висоти (63 мм), тобто до довжини робочого профілю ролика, який заправляє його за врізною схемою;

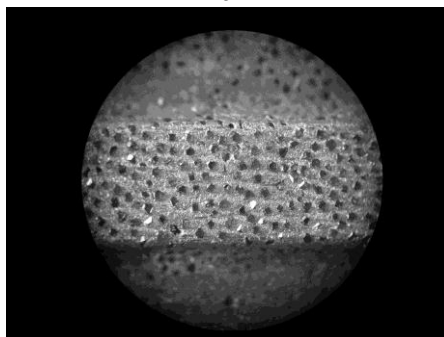
$$1 \text{ у.о.} = \frac{\pi}{4} (600^2 - 305^2) \cdot 63 / 63 = 2,097 \cdot 10^5 \text{ мм}^3/\text{мм}. \quad (1)$$



a



б



в

Рисунок 1 – Робоча поверхня алмазного правлячого ролика в плані:
а) середня частина, що виступає, як робоча і дві зовнішні занижені як базові,
б) розкрита робоча поверхня,
в) робоча поверхня після диспергування 1 у.о. абразивного матеріалу

Метод квазиврезної правки не тільки дозволив імітувати врзну, але ще економити кількість використовуваних в експериментах кругів. Коефіцієнт використання круга, як показано в [2], в нашому випадку, коли довжина робочого профілю $L = 3,35$ мм, дорівнював

$$63 \text{ мм} / 3,35 \text{ мм} = 18,8. \quad (2)$$

Це означало, що диспергувавши в експерименті, скажімо, половину круга $\varnothing 600 \times 63 \times 305$, випробовуваний ролик в виробничих умовах видаляв би

$$\frac{1}{2} \cdot 1 \text{ у.е.} \cdot 18,8 = 9,4 \text{ у.е.},$$

тобто повних – до посадки (!) – 9,4 круга $\varnothing 600 \times 63 \times 305$.

В результаті випробувань ролика без протекції було отримано наступні дані. Як і очікувалося, зі збільшенням об'єму x диспергованого матеріалу абразивних кругів, величина ω питомого об'єму кишень між алмазними зернами на робочій поверхні ролика мала тенденцію до стабілізації (рис. 2, а) і описувалася залежністю

$$\omega = (118 - 79 \cdot e^{-0,236 \cdot x}) \cdot 10^{-3}, \quad \text{мм}^3 / \text{мм}^2. \quad (3)$$

Порівнюючи останній вираз з законом гідроабразивного зносу [4, 5]

$$\omega(x) = \omega_{\max} - (\omega_{\max} - \omega_0) \cdot e^{-k \cdot x}, \quad (4)$$

отримали числові значення для таких величин: початковий питомий об'єм кишень – $\omega_0 = 39 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^3 / \text{мм}^2$, гранична величина питомого об'єму – $\omega_{\max} = 118 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^3 / \text{мм}^2$ і коефіцієнт, пов'язаний з темпом зносу зв'язки, – $k = 0,236 \text{ у.е.}^{-1}$. Початковий об'єм ω_0 було забезпечено попереднім вскриттям робочої поверхні правлячого інструменту стороннім абразивним кругом. Такий об'єм кишень (рис. 1, б) ще не був оптимальним для ріжучої здатності ролика, але вже забезпечував розміщення шламу при правці і допустимий рівень сил різання. Зі збільшенням об'єму диспергованого матеріалу абразивних кругів об'єм кишень збільшувався (рис. 1, в), але темп зносу зв'язки сповільнювався (рис. 2, а). Як видно з графіка, при диспергуванні 3,7 у.о. питомий об'єм кишень ω досяг величини $85 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^3 / \text{мм}^2$. Це значення виявилось критичним. На наступному кроці експерименту, коли в сумі було дисперговано 5 у.о., робоча поверхня ролика втратила 50% алмазних зерен, кишень досягли $95 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^3 / \text{мм}^2$ і руйнування

АГП пішло лавиноподібно. Граничне значення $\omega_{\max} = 118 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^3/\text{мм}^2$, – взяте з емпіричної формули (3) і що за фізичним змістом характеризує стадію припинення росту кишень, коли досягається динамічна рівновага абразивного зносу алмазних зерен і гідроабразивного зносу зв'язки, – так і не було досягнуто. Таким чином, період стійкості правлячого ролика з АГП без протекції в вищевказаних умовах склав 3,7 у.о. диспергованого матеріалу, а період до повного руйнування АГП – близько 5 у.о.

Для ролика з протекцією графік зміни питомого об'єму кишень відрізнявся від кривої першого ролика і описувався виразом

$$\omega = (79 - 40 \cdot e^{-0,527 \cdot x}) \cdot 10^{-3}, \quad \text{мм}^3/\text{мм}^2. \quad (5)$$

По-перше, як видно з рис. 2, а, при практично тому ж початковому об'ємі кишень темп їх зростання – менше. По-друге, об'єм встиг досягти граничного значення $\omega_{\max} = 79 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^3/\text{мм}^2$. Це значення утримувалося протягом тривалого часу – практично протягом диспергування 11 у.о. матеріалу кругів. Перші поодинокі вириви алмазних зерен з робочої поверхні спостерігалися в момент сумарного диспергування 7 у.о., а масові вириви, коли було втрачено 40% зерен, в момент диспергування 11,2 у.о. абразивного матеріалу шліфувальних кругів. Після цього, як і для ролика без протекції, руйнування АГП відбулося лавиноподібно. Дані вказують на безсумнівне збільшення ресурсу правлячого інструменту на 90% (7 у.е./3,7 у.е. = 1,9) і збільшення його «витривалості», тобто періоду до повного руйнування АГП – на 125% (11,2 у.е./5 у.е. = 2,24).

Вимірювання лінійного зносу δ роликів по робочому профілю показало наступне. Зі збільшенням об'єму x диспергованого матеріалу знос зростав лінійно і з однаковим темпом як для АГП без протекції, так і з протекцією (рис. 2, б):

$$\delta = 2,0 \cdot x, \text{ мкм} . \quad (6)$$

По-перше, це вказувало на характер зносу штучних алмазних зерен через мікроскалування, коли характерна (для природних алмазів) площадка зносу не утворюється. По-друге, як зазначалося вище, тут враховувався убуток алмазів виключно за рахунок його зносу, а не за рахунок його викидання з зв'язки. Тому знос зв'язки і міцність утримання зерен (звичайно, на стадії, що передує масовому викиданню зерен) не позначалися на розмірній стійкості інструменту; остання залежала тільки від міцності (марки) алмазного порошку, фізико-механічних характеристик кругів, що заправляються, та режимів правки.

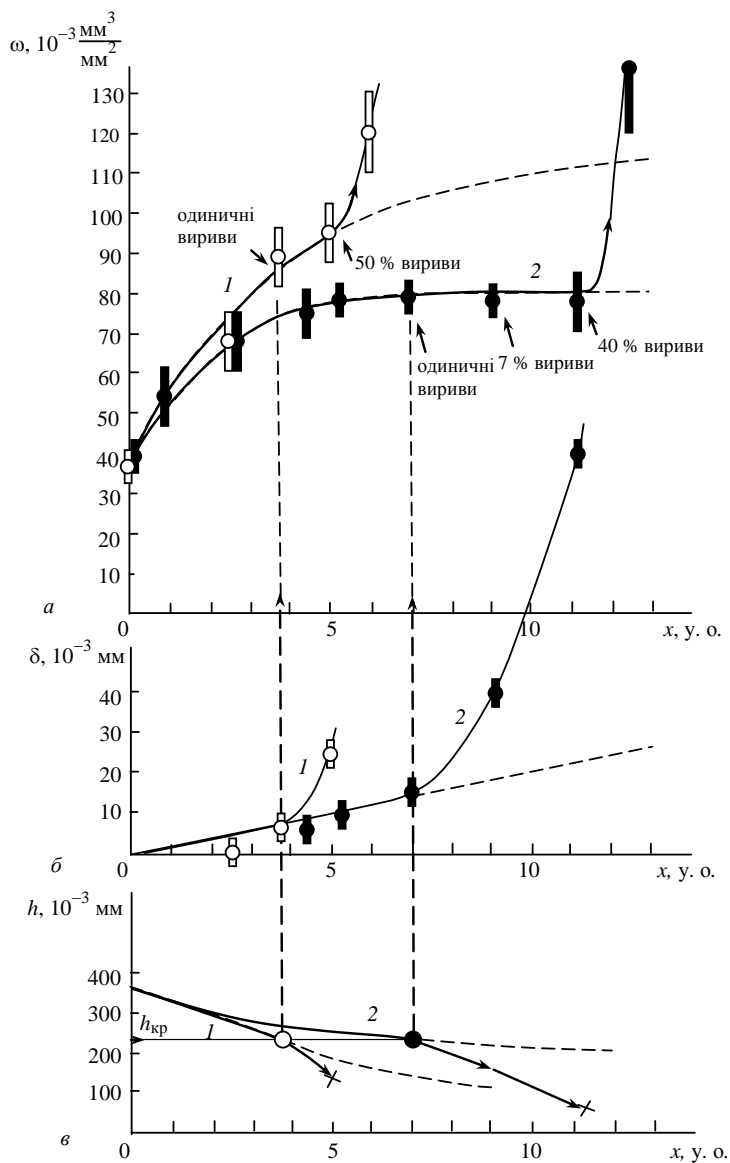


Рисунок 2 – Залежність питомої об'єму кишень (а),
лінійного зносу алмазного шару (б)
і середньої глибини закладення алмазного зерна (в)
в інструменті з АГП без протекції (криві 1) та з протекцією (криві 2)
від об'єму x диспергованого матеріалу

Як видно з графіка (рис. 2, б), для інструменту без протекції в момент диспергування 3,7 у.о. абразивного матеріалу, а для інструменту з протекцією – в момент 7 у.о., лінійна залежність змінюється на нелінійну, прогресивну. Це пояснюється початком виривів алмазних зерен, зменшенням числа зерен на робочій поверхні і, отже, збільшенням термо-силового навантаження на зерно і його більш інтенсивного розмірного зносу. Абсолютна величина лінійного зносу робочого профілю до кінця періоду стійкості по зносу зв'язки для інструмента без і з протекцією склала 7,4 мкм і 14 мкм відповідно. Зрозуміло, якщо технічне завдання на інструмент регламентує більш високу точність, його ресурс закінчується раніше. Але, з іншого боку, застосування алмазного порошку більш високих марок взагалі знімає питання розмірного зносу. Тому питання алмазоутримання і захисту вільної поверхні зв'язки від гідроабразивного зносу залишається (принаймні, для даних умов роботи) визначальним для збільшення періоду стійкості інструменту.

Для довідки було перераховано лінійний знос алмазів δ на традиційну питому витрату $Q_{\text{пит}}$:

$$Q_{\text{пит}} = \frac{\delta \cdot F \cdot n_c \cdot \pi \cdot d_p \cdot \gamma_a}{1 \text{ у.е.} \cdot \gamma_{\text{аб}}} =$$

$$= \frac{2 \cdot 10^{-3} \text{ мм} \cdot 8,78 \cdot 10^{-2} \text{ мм}^2 \cdot 6,0 \text{ мм}^{-2} \cdot \pi \cdot 125 \text{ мм} \cdot 3,5 \cdot 10^{-3} \text{ г/мм}^3}{2,097 \cdot 10^5 \text{ мм}^2 \cdot 2,13 \cdot 10^{-3} \text{ г/мм}^3} =$$

$$= 3,24 \cdot 10^{-6} \frac{\text{г}}{\text{г}} = 3,24 \frac{\text{мг}}{\text{кг}}, \quad (7)$$

де γ_a , $\gamma_{\text{аб}}$ – густина алмаза і абразивного круга, d_p – діаметр ролика, n_c

– питоме число алмазних зерен, $F = \frac{\pi}{6} d_v^2 = \frac{\pi}{6} (1,024 \cdot 0,4)^2 = 8,78 \cdot 10^{-2} \text{ мм}^2$ – середній переріз зерна.

Залишається вирішити питання про визначальний фактор, що обумовлює момент перших виривів алмазних зерен з робочої поверхні правлячого інструменту. Якщо для інструменту без протекції АГП цей момент відповідав об'єму кишень $\omega = 85 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^3/\text{мм}^2$, то для інструменту з протекцією – $79 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^3/\text{мм}^2$. Невже протекція мікропорошком послабила утримання зерен і вони виривалися при меншому зносі зв'язки? Чому ж тоді період стійкості такого інструменту збільшився на 90%? Звичайно ж ніякого послаблення нікелевої матриці не відбулося. Справа в тім, що для інструменту з протекцією на момент досягнення об'єму кишень $79 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^3/\text{мм}^2$ лінійний знос зерен досяг значення 14 мкм і вибрав частину величини закладення зерен у зв'язці. Дамо кількісні оцінки названих величин

і відстежимо їх функціональний зв'язок за допомогою аналізу найпростіших модельних уявлень.

Якщо через H позначити середню величину виступання (вильоту) зерна над зв'язкою, через h – середню глибину закладення зерна в зв'язці, через δ – як і вище, лінійний знос робочої частини зерна, а через d – діаметр зерна, що моделюється як куля (рис. 3), то очевидна рівність

$$d = \delta + H + h. \quad (8)$$

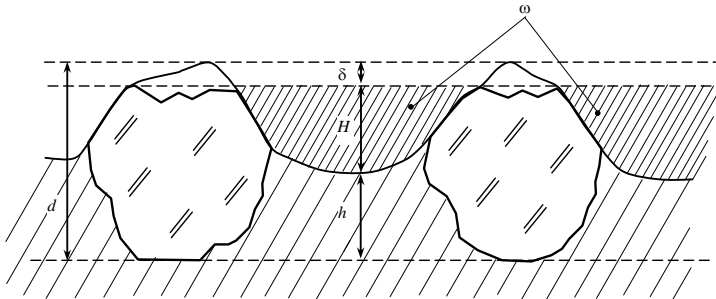


Рисунок 3 – До виводу зв'язку середніх величин лінійного зносу δ , вильоту над зв'язкою H і глибини закладення h в зв'язці алмазного зерна характерного розміру d

Питомий об'єм кишень як функція H і δ обчислюється за формулою

$$\omega(H, \delta) = H - \pi \cdot n_c \cdot \left((d - \delta) \delta H + \left(\frac{d}{2} - \delta \right) H^2 - \frac{1}{3} H^3 \right). \quad (9)$$

Підставляючи в (9) значення лінійного зносу δ як функції об'єму x диспергованого матеріалу круга (6) і прирівнявши отриманий вираз до виразу (4) питомого об'єму кишень як функції x , отримаємо рівняння щодо H . Це кубічне рівняння зручно розв'язувати чисельно. Отримаємо значення кореня як функцію об'єму диспергованого матеріалу $H = H(x)$. Далі знаходиться шукана середня величина глибини закладення

$$h(x) = d - H(x) - \delta(x). \quad (10)$$

Ця величина наведена (рис. 2, в) у вигляді двох кривих зміни середньої глибини закладення зерна: 1 – для інструменту без і 2 – для інструменту з протекцією. У критичних точках $x = 3,7$ у.е. і $x = 7$ у.е. криві 1 і 2 відповідно дають одне і те ж критичне значення глибини закладення $h_{кр} = 233 \cdot 10^{-3}$ мм. Це означає, що при такому закладенні, що складає 58% від висоти зерна

($d = 0,4$ мм), зерно виривається з матриці під дією поточних навантажень. (При більшому навантаженні на зерно – при відповідних режимах – критичне закладення буде більше, при менших – менше). Продовження кривих для x , більших критичних, накреслено пунктирною лінією, що відповідає лінійному закону зростання зносу алмазних зерен. Реальні криві, що відповідають нелінійному, прогресивному зростанню зносу, проведені суцільними зі стрілками; вони різко спускаються вниз. В точках $x = 5$ у.е. і 11,2 у.е. криві 1 і 2 відповідно обриваються, що відповідає повному руйнуванню АГП.

Таким чином, порівняльні стійкісні випробування алмазних правлячих роликів зі звичайним АГП і АГП з протекцією алмазним мікропорошком об'єктивно довели ефективність такої протекції. Ролики з захистом мають збільшений на 90% період стійкості і збільшений на 125% період до повного руйнування АГП. Крім того, на базі простих модельних уявлень про структуру алмазного шару правлячого інструменту теоретично відстежено динаміку зміни глибини закладення в зв'язці алмазних зерен, встановлено зв'язок цієї величини з характеристиками зносу зв'язки і алмазних зерен – з питомим об'ємом кишень і лінійним зносом відповідно.

Список використаних джерел: 1. *Шейко М. Н., Скок В. Н.* Формування алмазно-гальванічного покриття з протекцією алмазним мікропорошком в правячому інструменті // Сучасні технології в машинобудуванні: зб. наук. праць. – Вип. 11. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – 324 с. – С. 233-244. 2. *Шейко М.Н., Пасичный О.О., Скок В.Н., Бологов П.И.* Квазиврезная правка абразивных кругов как экспресс-метод испытания алмазных фасонных роликов. Сообщение 1. Регистрация сил правки // Сверхтвердые материалы. – 2009. – № 4. – С. 65-75. 3. *Шейко М. Н.* Абразивный износ отдельных зерен в алмазных роликах и брусках при правке абразивных кругов и его связь с износом алмазов в инструменте в целом // Сверхтвердые материалы. – 2007. – № 6. – С. 58-64. 4. *Шейко М. Н., Маккевич В. П., Немец В. М., Скок В. Н.* Эволюция рабочей поверхности алмазных брусков в процессе врезной правки // Сучасні процеси механічної обробки інструментами с НТМ и якість поверхні деталей машин: Зб. наук. роб. (Серія Г "Процеси механічної обробки, верстати та інструменти") НАН України. ІНМ ім. В. М. Бакуля. – Київ, 2006. – С. 118-125. 5. *Шейко М. Н., Бородавко Д. Н., Скок В. Н.* Эволюция рабочей поверхности алмазных правящих брусков на стадии, предшествующей ее разрушению // Сверхтвердые материалы. – 2007. – № 2. – С. 65-72.

Bibliography (transliterated): 1. Shejko M. N., Skok V.N. Formuvannja almazno-gal'vanichnogo pokrittja z protekcijeu almaznim mikroporoshkom v pravjachomu instrumenti / Suchasni tehnologii v mashinobuduvanni: zb. nauk. prac'. – Vip. 11. – Harkiv: NTU «HPi», 2016. – 324 s. – S. 233–244. 2. Shejko M. N., Pasichnyj O. O., Skok V. N., Bologov P. I. Kvazivreznaja pravka abrazivnyh krugov kak jekspress-metod ispytanjia almaznyh fasonnyh rolikov. Soobshhenie 1. Registracija sil pravki / Sverhtverdye materialy. – 2009. – № 4. – S. 65-75. 3. Shejko M. N. Abrazivnyj iznos otdel'nyh zeren v almaznyh rolikah i brusках pri pravke abrazivnyh krugov i ego svjaz' s iznosom almazov v instrumente v celom / Sverhtverdye materialy. – 2007. – № 6. – S. 58-64. 4. Shejko M.N., Mackevich V.P., Nemec V.M., Skok V.N. Jevoljucija rabochej poverhnosti almaznyh bruskov v processe vreznoj pravki / Suchasni procesi mehanichnoj obrabotki instrumentami s NTM i jakist' poverhni detalей mashin: Zb. nauk. robot (Serija G "Procesi mehanichnoj obrabotki, verstaty ta instrumenty") NAN Ukraini. INM im. V. M. Bakulja. – Kyiv, 2006. – S. 118-125. 5. Shejko M.N., Borodavko D.N., Skok V.N. Jevoljucija rabochej poverhnosti almaznyh pravjashhih bruskov na stadii, predshestvujushhej ee razrusheniju / Sverhtverdye materialy. – 2007. – № 2. – S. 65-72.